



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Timmo Antso

**SUVILA AUTONOOMNE ENERGIAVARUSTUSE
LAHENDUS PV PANEELIDEGA**

Autonomous Energy Supply Solution by PV Panels of
Summerhouse

Bakalaureusetöö
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: Andres Annuk, *PhD*

Tartu 2019

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Timmo Antso		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Suvila autonoomne energiavarustuse lahendus PV paneelidega			
Lehekülgi: 48	Jooniseid: 23	Tabeleid: 13	Lisasid: 2
Õppetool: Energiakasutuse õppetool			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERCS-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika,			
4.17. Energeetikaalased uuringud,			
T140 Energeetika			
Juhendaja(d): Andres Annuk, PhD			
Kaitsmiskoht ja -aasta:Tartu,2019			
<p>Bakalaureusetöö uuritavaks objektiks on Pärnumaal, Tori vallas, Muraka külas paiknev suvila, kus puudub elektrivõrgu ühendus. Peale suvila suuremaks ehitamist soovitakse hoones kasutada päikeseenergial põhinevat elektritootmist. Töö eesmärk on välja selgitada oletuslik tarbimine ning valida selle põhjal sobilikud päikeseenergia süsteemi seadmed. Kinnistul asub suvila ja abihoone, seadmed hakkavad paiknema abihoones ning päikesepaneelid paigaldatakse maaraamidega kõrval olevale heinamaale. Ööpäevane energiatarve oli 1667 Wh, kus arvestati seadmete võimsust ning tööaega ööpäevas. Sellest lähtuvalt arvutati sobilik akupanga mahutavus, milleks saadi 347 Ah. Valitud akudega saavutati akupank mahutavusega 450 Ah ning süsteemi pinge määrati 24 V DC. Vajaminevate päikesepaneelide arvutuslik võimsus tuli 1256 W. Inverteriks ning laadmiskontrolleriks valiti kaks ühes seade Victron Energy EasySolar 24/1600/40. Valikul sai määravaks kompaktsus ning valmis terviklahendus. Kogu süsteemi arvutuslik maksumus tuli 4748,7 €. Kuna eelnevalt puudus hoonel energiatarbimise ajalugu ning seadmed on valitud arvutuslikul meetodil, siis järgmine samm oleks valmis süsteemi paigaldamine ja katsetamine. Selle tulemusena saaks teha täiendusi antud süsteemis.</p>			
Märksõnad: suvila, päikesepaneelid, võrguvaba, päikeseenergia, inverter, laadimiskontroller			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Timmo Antso		Curriculum: Engineering	
Title: Autonomous Energy Supply Solution by PV Panels of Summerhouse			
Pages: 48	Figures: 23	Tables: 13	Appendixes: 2
Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering, 4.17. Energetic Research, T140 Energy Research Supervisors: Andres Annuk, PhD Place and date: Tartu, 2019			
<p>The subject of the bachelor thesis is a summer house in Pärnu County, Tori municipality, Muraka village, where currently there is no grid connection. After the summer house expansion, the building would be using off-grid PV-system. The purpose of the thesis is to identify the hypothetical consumption and based on this info choose suitable PV-system equipment. The property has a summer house and ancillary building. The equipment will be located in the ancillary building and the solar panels will be installed in the field next to the building with ground frames. The calculated daily energy consumption was 1667 Wh, which was calculated taking into account the equipment power and equipment working hours per day. According to the calculations, the capacity of a suitable battery bank was 347 Ah. The battery bank reached 450 Ah with the selected batteries and the system voltage was set to 24 V DC. The calculated solar panel power was 1256 W. Two in one device Victron Energy EasySolar 24/1600/40 was chosen as an inverter and a solar charge controller. The compactness as well as the complete solution became the determining factor in the choice of devices. The calculated cost of the whole system was 4748,7 €. Since there was no history of energy consumption in the building and the system was computationally selected, the next step would be to set up and test the finished system. After the testing has been done, the system could be upgraded.</p>			
Keywords: summerhouse, solar panels, off-grid, solar energy, inverter, charge controller.			

SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID	5
SISSEJUHATUS	7
1. HOONE JA ASUKOHA KIRJELDUS	8
1.1. Asukoht	8
1.2. Suvila ja abihoonete kirjeldus	8
2. ENERGIAVAJADUS	10
2.1. Energiavajaduse meetodiline juhend	10
2.2. Tarbijate energiavajadus	11
3. ENERGIASALVESTI	13
3.1. Autonoomse süsteemi süvatsükliakud	13
3.2. Avatud süvatsükli plii-happeaku	14
3.3. Suletud süvatsükli VRLA-akud	15
3.4. Liitium-ioonaku	17
3.5. Plaanitava süsteemi akude valik ning vastavad arvutused	18
4. PÄIKESEPANEELID	22
4.1. Paigaldusmeetod ja asukoha valik	22
4.2. Töö jaoks vajaminevate päikesepaneelide valik ning arvutused	27
4.2.1. Päikesepaneelide võimsus	27
4.2.2. Päikesepaneelide valik	30
5. INVERTER JA LAADIMISKONTROLLER	34
6. ÜHENDUSSKEEM	38
7. KAITSE ELEKTRILÖÖGI EEST	39
8. SÜSTEEMI LIGIKAUDNE MAKSUMUS	40
KOKKUVÕTE	42
KASUTATUD KIRJANDUS	44
LISAD	46
Lisa 1. Maakruvi	47
Lisa 2. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	48

TÄHISED JA LÜHENDID

AC – vahelduvvool

AGM – *absorbed glass mat*, immutatud klaaskiust matid

$\alpha_{k/s}$ on kevad/sügis päikesepaneelide kaldenurk, °

α_s on suvine päikesepaneelide kaldenurk, °

α_t – talvine päikesepaneelide kaldenurk, °

B – laiuskraad, °

C – akude mahutavus, Ah

DC – alalisvool

DoD – *depth of discharge*, tühjaks laetuse tase

E – seadme ööpäevane elektritarve, Wh

E_c – akupanga energia mahutavus, Wh

E_d – keskmiselt toodetud energia kogus päevas, Wh/p

E_l – päevas keskmiselt mitte salvestatud energia, Wh/p

E_m – valgustihedus, lx

E_p – süsteemi ööpäevane elektritarve, Wh

E_{pe} on päevane energiavajadus, mis arvestab temperatuuri ja mustuse sõltuvust, Wh

H₂ – vesinik

H₂O – vesi

H₂SO₄ –väävelhape

I – süsteemis tekkiv vool, A

I_{mpp} – maksimaalse võimsuspunkti vool, A

I_{sc} –päikesepaneeli lühisvool, A

K – koefitsient, mis arvestab kasutamise intensiivsust

LFP – Liitium raudfosfaat

MPPT – maksimaalse võimsuspunkti jälgimine

O₂ – hapnik

off-grid – võrguvaba

P – seadme võimsus, W

Pb – plii

PbO_2 –pliidioksiid

P_k – süsteemi kogutarbimine, W

P_{max} –päikesepaneeli maksimaalne võimsus, W

PV – *photovoltaic*, valguse muutmine elektrienergiaks

PVGIS – *Photovoltaic Geographical Information System*

P_{pv} on paneelide võimsus, W

PWM – pulsilaiusmodulatsioon

s – süsteemi sõltumatuse aeg päevades

t – seadme tööaeg, h

thin film –õhuke kile (sadestatud kilega)

true sine wave – puhas siinus

U – süsteemi pinge, V

U_a – akupinge, V

U_{mpp} – maksimaalse võimsuspunkti pinge, V

UPS – puhvertoiteallikas

U_{oc} – avatud ahela pinge, V

VRLA – *Valve Regulated Lead-acid Battery*, Ventiiliga reguleeritav plii-happeaku

SISSEJUHATUS

Tänapäeval on raske ette kujutada elu ilma elektrita ning elektriseadmeteta, eriti kui see puudutab eluhooneid ning igapäevaseid tegevusi. Kui puudub kinnistul võrguühendus, tuleks leida sobivaim alternatiiv energialahendus, mis tagaks vähemalt esmased elektrienergia vajadused ning mida oleks kasutajal lihtne hooldada.

Antud töö raames käsitletakse suvila varustamist *off-grid* päikeseelektrijaamaga, et tagada tööriistade kasutamise ja igapäevaste elementaarsete kodumajapidamises kasutust leidvate seadmete töö nagu näiteks külmkapp ja veeautomaat. Töö eesmärk on esmalt selgeks teha tarbimisvajadus ning sellest lähtuvalt planeerida suvilale väike päikeseenergia elektrijaam. Töö ülesanded on:

- 1) arvutada eeldatav energiavajadus päevas;
- 2) valida välja lõpplahenduse jaoks sobilikud seadmed;
- 3) valida seadmete parameetrid vastavalt konkreetsele lahendusele;
- 4) arvutada ligikaudne seadmete ja tarvikute maksumus.

Sobilikud seadmed valitakse võttes arvesse konkreetset: 1) objekti, 2) hoone kasutatavust ning 3) asukohta. Päikesepaneelide võimsus arvutatakse vastavalt tarbimisele ning tulemusi kontrollitakse kasutades PVGIS keskkonda, kus saab simuleerida asukoha koordinaatide ning süsteemi parameetrite järgi päikesepaneelide tootlikkust [25]. Töö lõpuks peaks olema selge süsteemi ligikaudne maksumus ning nimekiri vajaminevatest seadmetest.

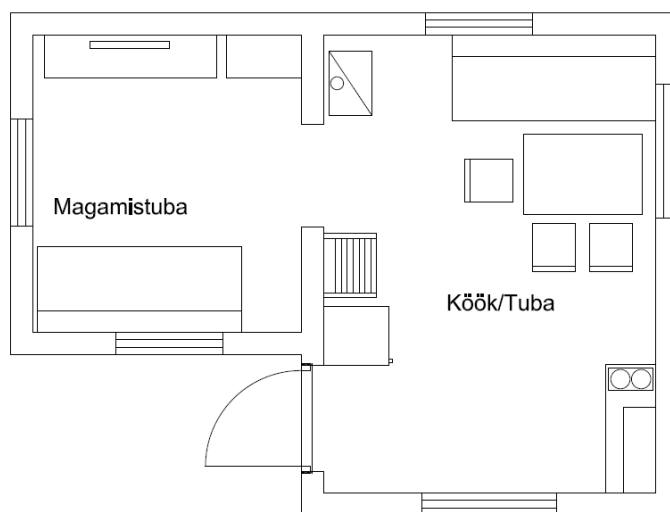
1. HOONE JA ASUKOHA KIRJELDUS

1.1. Asukoht

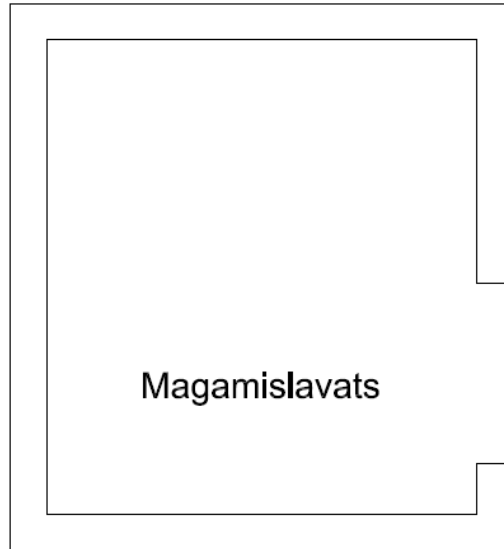
Päikeseenergia süsteem planeeritakse rajada Pärnumaale, Tori valda, Muraka külla, mille asukoha koordinaadid on B: 58°30'9,118" L: 24°51'43,052". Krundi suurus on 3,59 ha, mis on antud hetkel 100-protsenti maatulundusmaa [1]. „Maatulundusmaa on põllumajandussaaduste tootmiseks või metsakasvatuseks kasutatav maa või maa, millel on metsa- või põllumajanduslik potentsiaal“ [2]. Uue detailplaneeringu kohaselt muudetakse 1,2 ha sellest alast elamumaaks. „Elamumaa on alaliseks või perioodiliseks elamiseks ettenähtud ehitiste ja garaažide maa. Elamu, sh korterelamu, suvila, aiamaja alune ja selle juurde kuuluva majapidamis- ja abiehitise alune ja neid ehitisi teenindav maa“ [2].

1.2. Suvila ja abihoonete kirjeldus

Antud hetkel asetseb antud kinnistul alla kahekümne ruutmeetrine suvila, mis peale uue detailplaneeringu jõustumist ehitatakse ümber kolmekümne ruutmeetriseks hooneks. Suvila esimesel korrusel on köök/tuba suurusega 16,45 m² ja magamistuba suurusega 8,64 m² (joonis 1.1) Suvila teisel korrusel asub magamislavats suurusega 8,64 m² (joonis 1.2). Arvutused ning joonised on tehtud rajatava hoone järgi.



Joonis 1.1. Esimese korruse plaan



Joonis 1.2. Magamislavatsi joonis

Lisaks suvilale asub kinnistul veel abihoone suurusega 9 m², kuivkäimla ning välidušši ruum. Abihoones hakkavad paiknema energiasalvestid ning vajalikud seadmed, abihoone kaugus suvilast on 5,2 m. Suvilat kasutatakse peamiselt ainult aprillist septembrini ehk kuus kuud aastas. Talvine kasutus maksimaalselt kord kuus, seega ei valmista probleeme asjaolu, et PV-süsteemi tootlikkus on talvekuudel väiksem.

2. ENERGIAVAJADUS

2.1. Energiavajaduse metoodiline juhend

Selleks, et rajada *off-grid* energiasüsteem, mis on sisuliselt väike elektrijaam, tuleks välja selgitada tarbimine. Kui eelnevalt oleks olemas võrguliitumine, siis saaks Elektrilevi kodulehel teha tarbimisanalüüs ning sellest lähtuvalt valida sobiliku tootlikkusega päikesepaneelid ning piisava mahutavusega energiasalvestid. Antud juhul tuleks välja selgitada planeeritavad tarbijad ning nende tarbitav võimsus. Arvutuste jaoks on vaja ka oletuslikult välja selgitada tarbimise aeg tundides ühe ööpäeva jooksul ning kogusummale lisada varutegur. Ööpäevane kasutusaeg on määratud kasutaja poolt oletuslikult. Varutegur peaks katma ajutiste tarbijate vajaduse, mis pole igapäevaseks tegevuseks vajalikud, aga aegajalt leiavad kasutust.

Seadme võimsuse leiab üldjuhul kaasasolevast dokumentatsioonist, mõningal juhul on väljatoodud ka aastane voolutarve. Seadmete valikul tuleks valida võimalikult säästlikud lahendused, et hoida tarbimine madal, mis omakorda toob alla rajatava väikeelektrijaama hinna.

Seadme ööpäevane elektritarve on leitav valemist

$$E = P \cdot t, \quad 2.1$$

kus E on seadme ööpäevane elektritarve Wh;

P – seadme võimsus W;

t – seadme tööaeg [3: 141].

Kuna akude ja inverterite kasutegurid on ligi 90-protsenti, siis süsteemi ööpäevase energiavajaduse leiame valemist

$$E_p = \Sigma E \cdot 1,1, \quad 2.2$$

kus E_p on süsteemi ööpäevane energiatarve Wh;

ΣE – seadmete ööpäevase energiatarbe summa Wh;

1,1 – kasutegurist tulenev kordaja [3.141].

2.2. Tarbijate energiavajadus

Suvila valgustite koguse ja vajaliku võimsuse määramiseks on koostatud valgustuse projekteerimistarkavaraga DIALux evo hoonete valgustuslahendus. Antud hetkel pole Eesti Vabariigis kehtestatud valgustusnõudeid eluruumides, seega on lähtutud standardist EVS-EN 12464-1:2011. Seatud nõuded ja ruumi kirjeldus on kantud tabelisse 2.1.

Tabel 2.1. Valgustusnõuded ruumidele [4]

<i>Esitusnumber</i>	<i>Piirkonna liik, nägemisülesanne või tegevus</i>	<i>E_m lx</i>
5.2.2	<i>Puhkeruumid</i>	100
5.2.4	<i>Riidehoiud, pesuruumid, vannitoad, tualettruumid</i>	200
5.3.1	<i>Hoonetehnikapaigaldised, lülitus-aparaatide ruumid</i>	200

Tabelisse 2.2 on kantud mõõtetulemused ning mõõtmiseks vajaminev info koos lampide võimsuse ja kogusega. Joonisel 2.1 on kujutatud köök/toa valguslahendus 3D joonisena.



Joonis 2.1. Kööktuba 3D joonis

Tabel 2.2. Mõõtetulemused DIALux keskkonnas

Ruum	Töötasapinna kõrgus, m	Lae kõrgus, m	Saadud keskmine valgustihedus, lx	Lampide arv, tk	Valgusallika võimsus	Pindala, m ²
Magamistuba	0	2,1	190	4	7,8	8,64
Kööktuba	0	3,2	114	4	7,8	16,45
Magamislavats	0	1,39	99,2	1	9	8,64
Tualettruum	0	2.1	180	1	7,8	1.5
Abihoone	0	2,3	292	2	16	9

Tabelis 2.3 on välja toodud kõik tarbijad ning tehtud arvutused kasutades valemeid 2.1 ja 2.2.

Tabel 2.3. Energiavajadus

Tarbija	Kogus, tk	P , W	t , h	E , Wh
Veeautomaat	1	580	0,5	290
Külmkapp	1	100	5*	500
Televiisor	1	41	1	41
Makita laadija	1	240	0,5	120
Ryobi laadija	1	50	0,5	25
Raadio	1	35	5	175
Varutegur	1	100	1	100
Magamistuba (valgustus)	4	7,8	2	62,4
Kööktuba (valgustus)	4	7,8	4	124,8
Magamislavats (valgustus)	1	9	0,5	4,5
Tualettruum (valgustus)	1	7,8	1	7,8
Abihoone (valgustus)	1	16	0,5	8
Välisvalgusti	1	19	3	57
			E_p	1667

*Arvestatud on mootori võimsust ja keskmist tööaega ühes ööpäevas.

Arvutustest selgub, et ööpäevane energiavajadus on 1667 Wh ehk 1,667 kWh. Sellest lähtuvalt saab valida akude mahutavuse ning päikesepaneelid.

3. ENERGIASALVESTI

3.1. Autonoomse süsteemi süvatsükliakud

PV-paneelidest saadud energia tuleb salvestada energiasalvestitele, et oleks tagatud energia varustus ka päikesevabal perioodi, kui paneelide tootlikkus on null või liiga väike, näiteks nii saab tagada öise elektriseadmete kasutuse. Võrguühendusega süsteemis on asi lihtne, kõik ülejääv energia müüakse võrku ning kui PV-paneelid ei tooda energiat, siis tarbitakse võrgust.

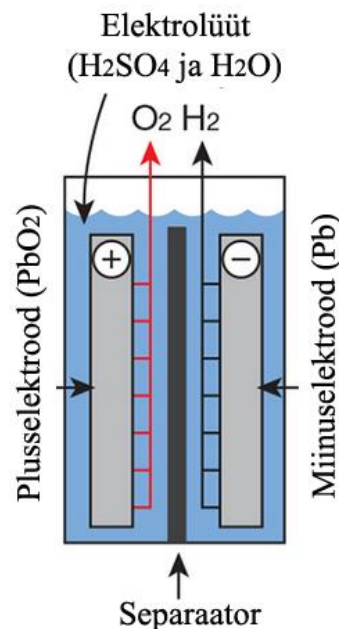
Peamiselt kasutatakse kodustes *off-grid* süsteemides energia salvestamiseks akusid. Kõrvuti elektriautode arenguga liigub edasi ka akude arendus, eesmärk on viia akude mõõtmed väiksemaks, kuid samas mahutada järjest rohkem energiat akudesse, näiteks metall-hübriid ning liitium-ioon akud [3:131]. Kindlat reeglit aku valimisel pole, ainuke kindel kriteerium on, et tegu peab olema süvatsükliakuga.

Süvatsükliaku on disainitud nii, et aku tagaks pideva võimsuse pikemal perioodil ja on töökindel kuni 80-protsendise tühjakslaadimiseni või rohkem, sõltuvalt akust. Peale seda tuleb aku uuesti laadida. Kuigi süvatsükliakut võib tühjaks laadida kuni 80-protsendini, siis tootjad üldjuhul soovivad mitte alla 45-protsendi tühjaks laadida, et tagada võimalikult pikk aku eluiga. Erinevus starterakudega seisneb selles, et starteraku eesmärk on anda lühikese aja kestel tugevat voolu ja siis vajab uuesti laadimist. Täpsemalt öeldes starteraku tühjeneb tavaliselt 2-5-protsendini igal kasutuskorral.[8] Süvatsükliakude puhul tuleb järgida laadimistsüklite arvu. Kõik ei pruugi sobida *off-grid* süsteemi jaoks. Näiteks on väljatoodud, et UPS akudel on lubatud küll 100-protsendine tühjenemine, DoD 100-protsenti, mis olemuselt võiks sobida *off-grid* süsteemi, aga laadimistsüklite arv on kordades väiksem, keskel läbi 200-500 korda [3:131]. Tulemuseks on kordades tihedam akude väljavahetamine, mis omakorda viib kogu süsteemi hoolduskulud kõrgeks. DoD viitab, kui palju aku mahutavusest on kasutatud, enamasti tootjad annavad maksimaalse DoD ette, et tagada pikem eluiga ning parim töökindlus [9].

Enamlevinumad aku tüübid *off-grid* süsteemis on: 1) avatud süvatsükli plii-happeakud, 2) suletud süvatsükli VRLA-akud (geelakud ja AGM-akud) ja 3) liitium-ioon akud.

3.2. Avatud süvatsükli plii-happeaku

Esimene pliiaku valmis aastal 1859, mille autoriks oli prantsuse füüsik Gaston Planté [12]. Sellest ajast alates on pidevalt arendatud antud tehnoloogiat, mille tulemusena on tegu väga töökindla ja pika elueaga akuga. Avatud pliiaku sees on kaks elektroodi, pluss ja miinus. Plusselektrood on valmistatud pliidioksiidist (PbO_2) ning miinuselektrood valmistatakse poorsest pliist (Pb), mis omakorda uputatakse vee (H_2O) ja väävelhappe (H_2SO_4) lahusesse (joonis 3.1) [13:71]. Vee osakaal on 65-protsenti ning väävelhappe osakaal 35-protsenti [13:71]. Laadimise ajal vabanevad vesiniku ja hapniku gaasid, sest mõned elektrolüüdi veemolekulid lagunevad elektrolüüsi käigus [14].



Joonis 3.1. Lihtsustatud avatud pliiaku ehitus [10].

Avatud süvatsükli plii-happeaku eelised [11]:

- 1) pikem eluiga kui suletud süvatsükli VRLA-akudel;
- 2) lihtne hooldus, mille käigus tuleb lisada vajadusel destilleeritud vett;
- 3) parem töökindlus soojemas kliimas;
- 4) parem saadavus ning hinna ja mahutavuse suhe.

Avatud süvatsükli plii-happeaku puudused;

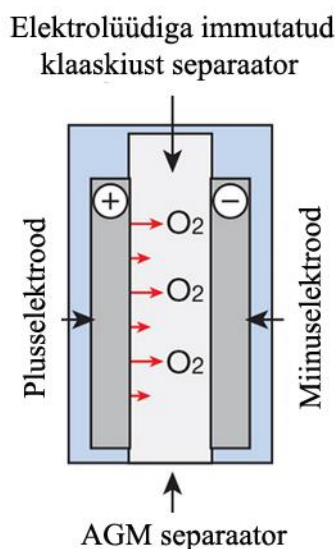
- 1) hooldusvajadus [11];

- 2) ladustamine ainult püstises asendis [11];
- 3) toodab laadimise käigus ohtliku vesiniku ja hapniku segu, mis on tuleohtlik [10];
- 4) ülelaadimisel võib väljuda akust hapet [11];
- 5) peab olema ventileeritav ruum, eluruumides ei saa kasutada [10];
- 6) tundlik ülelaadimise suhtes [10];
- 7) isetühjenemine toimub kiiremini kui suletud süvatsükli VRLA-akudel [11].

3.3. Suletud süvatsükli VRLA-akud

Suletud süvatsükli VRLA-akud jagunevad geelakudeks ja AGM-akudeks. Tööpõhimõttelt on nad sarnased avatud pliiakudega, suurim erinevus seisneb selles, et nad on suletud ventiilidega, mis reguleerivad aku sisest rõhku ning takistavad vesiniku väljumist [13].

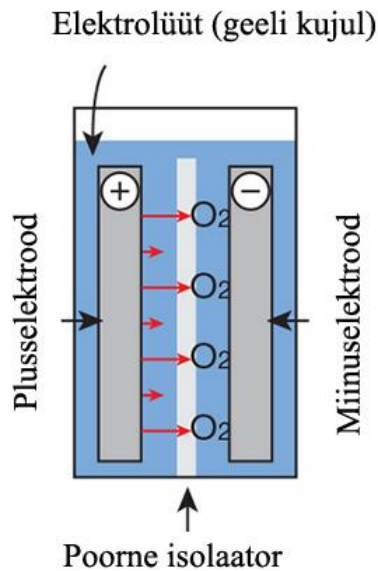
AGM-aku erinevus seisneb selles, et pluss-elektrood toodab hapnikku, mis imendub miinuselektroodi, mis omakorda kutsub esile vesiniku tekke miinuselektroodil. Hapniku ja vesiniku ühinemisel tekib vesi, mis tagab vajaliku elektrolüüdi taseme. Elektrolüüt on immutatud spetsiaalsesse klaaskiust isolaatorisse (joonis 3.2).[15]



Joonis 3.2. Lihtsustatud AGM-aku ehitus [10].

Geelaku erinevus võrreldes avatud pliiakuga seisneb selles, et elektrolüüt on omadustel geel, mis seisab kindlalt pluss-ja miinuselektroodi vahel (joonis 3.2). Separaator on mikropoorsest materjalist, mis: 1) vähendab miinuselektroodi depolarisatsiooni ning väldib

miinuselektroodide sulfaatimist ja 2) aitab vältida dendriitide teket pluss- ja miinuselektroodide vahel sügavtühjenemise käigus, mis omakorda võivad põhjustada lühiseid. [15]



Joonis 3.3. Lihtsustatud geelaku ehitus [10].

AGM-aku võrdlus geelakuga [10]:

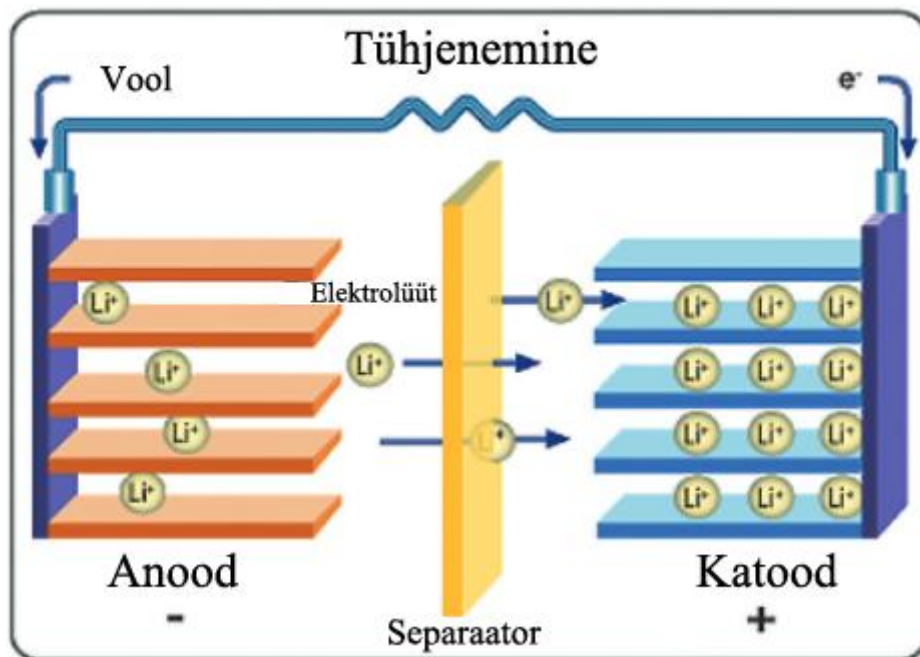
- 1) geelakudel on pikem eluiga ja võimaldab kõrgemat DoD protsenti ilma akut kahjustamata, aga vajab spetsiifilist laadimismeetodit;
- 2) AGM-akud võimaldavad kõrgemat tühjakslaadimise voolu, mis võimaldab kasutada neid ka starterakudena .

AGM-akude ja geelakude olulised märksõnad [10]:

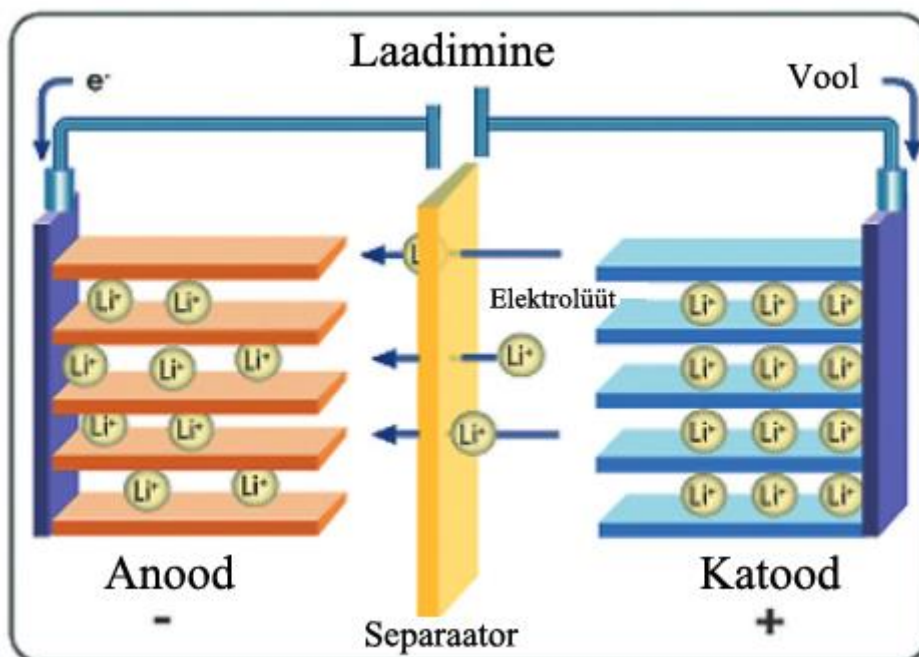
- 1) hooldusvaba;
- 2) tööiga on lühem kui korrektselt hooldatud avatud plii-happeakul, aga eluiga on pikem kui hooldamata avatud plii-happeakul;
- 3) hinna ja mahutavuse suhe on parem kui liitium-ioon akudel;
- 4) odav transportida ning ohutum käsitleda kui avatud plii-happeakusid;
- 5) lai töötemperatuuri vahemik;
- 6) üks ohutumaid akutüüpe, ohtlikud gaasid väljuvad ainult tugeval ülelaadimisel.

3.4. Liitium-ioonaku

Liitium-ioonaku tüüpe on erinevaid, kuid kõige sobilikum *off-grid* süsteemiks on liitium raudfosfaat aku ehk LFP. LFP-akud on väiksed ning kerged, kuid samas hea mahutavusega. LFP-akusid peetakse liitiumakudest kõige ohutumateks. [10]



Joonis 3.4. LFP-aku tühjenemine [16].



Joonis 3.5. LFP-aku laadimine [16].

Ehituslikult koosneb LFP-aku kolmest kihist, mis on keritud rulli. Aku koosneb anoodist, katoodist, isolaatorist ja elektrolüüdist. Anood valmistatakse kas grafiidist või süsinikust. LFP-aku puhul valmistatakse katood liitium raudfosfaadist ning isolaator valmistatakse läbilaskvast membraanist, mis võimaldab liitiumi ioonidel edasi ja tagasi liikuda ning välistab anoodi ja katoodi lühist. Tühjenemisel liiguvad liitiumi ioonid anoodilt katoodile, elektronid liiguvad välimises ahelas liitiumi ionidega samas suunas ning vool vastupidises suunas (joonis 3.4). Laadimise ajal rakendab väline toiteallikas akule ülepinge, mille käigus liiguvad liitiumi ioonid katoodilt anoodile, elektronid liiguvad välimises ahelas liitiumi ionidega samas suunas ning vool vastupidises suunas (joonis 3.5).[16]

3.5. Plaanitava süsteemi akude valik ning vastavad arvutused

Kõigepealt tuleb arvutada vajalik akupanga energia mahutavus. Selleks tuleks ära määrata kaua süsteem peaks vastu pidama ilma laadimata. Üldjuhul on soovituslik võtta kahe või kolme päevase varuteguriga. Kuna antud süsteem on enamjaolt kasutusel ainult aprillist septembrini, mil üldjuhul on PV-paneelide tootlikkus suhteliselt suur, siis valime sõltumatuse ajaks 2 päeva.

Akupanga energia mahutavus on leitav valemist

$$E_c = \frac{s \cdot E_p}{0,4}, \quad 3.1$$

kus E_c on akupanga energia mahutavus Wh;

s – süsteemi sõltumatuse aeg päevades;

E_p – päevane energiavajadus Wh;

0,4 – näitab, et kasutame 40-protsenti akupanga mahutavusest, et tagada pikaajalisus

[3:141].

Arvutame akupanga energia mahutavuse valemiga 3.1

$$E_c = \frac{2 \cdot 1667}{0,4} = 8335 \text{ Wh}$$

Järgmiseks leiame akude mahutavuse ampertundides, selle alusel saame valida loodava süsteemi akud.

Akude mahutavus ampertundides on leitav valemist

$$C = \frac{E_c}{U_a}, \quad 3.2$$

kus C on akude mahutavus Ah;

E_c – on akupanga energia mahutavus Wh;

U_a – akupinge V [3.141].

Mahutavuse leidmiseks ampertundides tuleks ära määrata loodava süsteemi pinge. Üldjuhul valitakse süsteemi pingeks: 1) 12 V DC, 2) 24 V DC või 3) 48 V DC. Valiku tegemisel tuleb arvesse võtta tarbijate koguvõimsust, mis tekib samaaegsel kasutamisel ning selle järgi arvutada tekkiv vool kasutades siis kas 1) 12 V DC, 2) 24 V DC või 3) 48 V DC. Mõistlik oleks valida süsteemi pinge selline, et voolu tarve poleks suurem kui 100A. Mida suurem on voolu tarve, seda kallimaks läheb süsteem, vaja läheb näiteks suurema ristlõikega kaableid, võimsamaid invertereid, suuremaid kaitsmeid jne, mis muudavad oluliselt süsteemi hinda.

Süsteemi vool kogutarbimise juures on avaldatav valemist

$$P_k = U \cdot I, \text{ siit } I = \frac{P_k}{U}, \quad 3.3$$

kus P_k on süsteemi kogutarbimine W;

U – süsteemi pinge V;

I – süsteemis tekkiv vool A.

Tabelisse 3.1 on kantud arvutustulemused kasutades valemit 3.3 erinevate toitepingete juures.

Tabel 3.1. Voolu arvutamine erinevatel süsteemi pingetel

U, V	I, A
12	101
24	51
48	25

24 V ja 48 V DC süsteemi eelised:

- 1) parem inverteri kasutegur ning väiksemad kaod DC muundamisel 240 V-ks AC ning muunduri väljundpinge on stabiilsem;
- 2) sõltumata koormusest vähendab DC ahela voolu poole võrra ning kaod vähenevad $\frac{1}{4}$, mis omakorda vähendab tulekahju riski;
- 3) 24 V ja 48 V DC puhul on liinikaod väiksemad kui 12 V DC puhul [5].

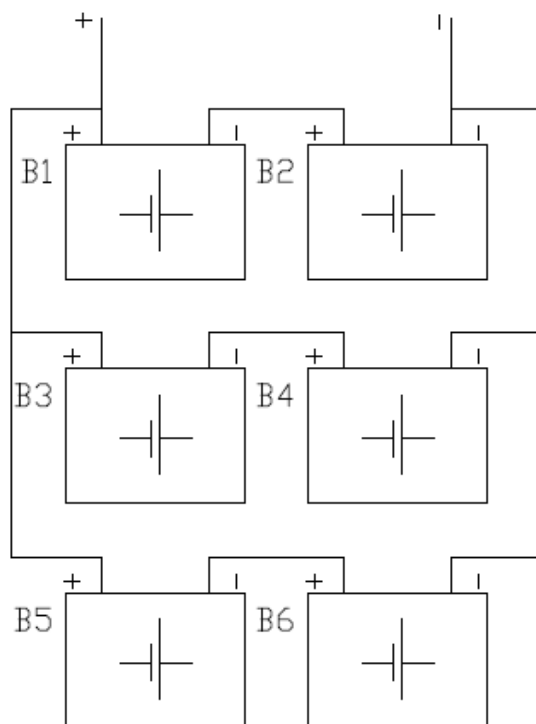
Antud süsteemi puhul valitakse süsteemi pingeks 24 V ning arvutatakse valemi 3.2 abil akude mahutavus ampertundides.

$$C = \frac{8335}{24} = 347 \text{ Ah}$$

Loodava akupanga mahtuvus peab olema vähemalt 350 Ah.

Aku valikul sai määravaks ohutus ning võimalikult väike hooldusnõue akudele. Eluea ja laadimise kordade arvu mõistes oleks võinud valida avatud süvatsükli plii-happeaku, aga suvila puhul on raskendatud pidev elektrolüüdi taseme jälgimine ning vajadusel destilleeritud vee lisamine, seega antud töö puhul on valitud suletud VRLA-akud, mis ei vaja regulaarset elektrolüüdi taseme kontrollimist. Teine oluline kriteerium oli hind.

Antud lahenduse tarbeks kasutatakse HOPPECKE SOLAR.BLOC 150 12V AGM-akusid [6]. Kuuest akust moodustatakse akupank andmetega 24 V DC ning 450 Ah. Joonisel 3.6 on kujutatud akupanga ühendusviis. Koostatud on kolm gruppi, mis moodustavad jadamisi ühendades ühe grupi. Esimeses, teises ja kolmandas grupis on ühendatud kaks 12 V 150 Ah akut jadamisi, et tagada 24 V DC ning seejärel on ühendatud esimene, teine ja kolmas grupp omavahel paralleelselt, saavutades sellega vajaliku akupanga mahutavuse 450 Ah, mis ületab miinimum nõude antud töö puhul.



Joonis 3.6. Akupanga ühendusskeem.

Tabel 3.2. Aku andmed [6]

Tootja	Hoppecke
Aku tüüp	AGM
Pinge, V	12
Laadimistsüklite arv 50% <i>DoD</i> juures	1500
C_{20} aku mahutavus 20-protsendilise tühjenemise korral, Wh	1752
C_{20} aku mahutavus 20-protsendilise tühjenemise korral, Ah	146
C_{100} aku mahutavus 100-protsendilise tühjenemise korral, Ah	150

Tabelis 3.2 on välja toodud valitud aku olulisemad põhiandmed.

4. PÄIKESEPANEELID

4.1. Paigaldusmeetod ja asukoha valik

Paigaldamise viis ja asukoha valik on üks olulisemaid kriteeriumeid, kui soovitakse saavutada süsteemile maksimaalne tootlikkus. Paigaldamise viise on erinevaid, nagu näiteks 1) katustele, 2) fassaadidele, 3) maapinnale kui ka 4) akende varjudena. Peamiselt leiavad kasutust kaks viisi, kas katusele või maapinnale. [19] Lähtuda tuleks olemasolevast vabast paigaldusalast.

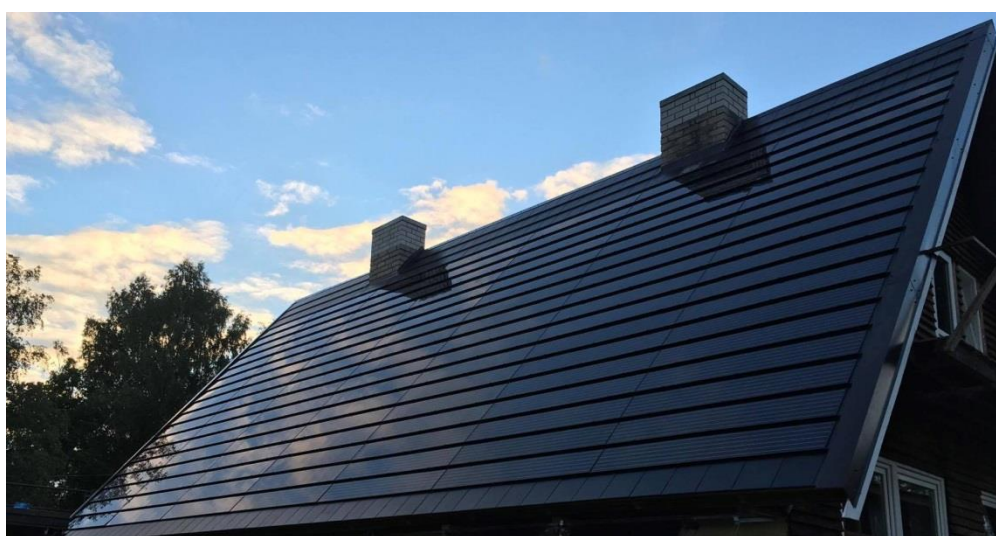
Katusele paigaldamise viise on erinevaid. Paigaldada saab nii viilkatustele (joonis 4.1) kui ka lamekatustele (joonis 4.2). Lamekatuste eelis võrreldes viilkatustega seisneb selles, et seal saab valida sobiva kaldenurga ning ka päiksepaneelide suuna. Viilkatuse puhul määrab ära selle katuse kalle ning maja asetus, mis määrab oluliselt ära päiksepaneelide tootlikkuse. Katusele paigaldamisel tuleb jälgida ka kõrval asuvaid objekte, mis võivad päikesevalguse ära varjata. Lisaks tuleb arvestada katuse konstruktsiooniga ning kandevõimega. Järjest rohkem leiab viilkatuste puhul kasutust PV-paneelide kasutamine katusekattena (joonis 4.3), eriti kui ehitatakse uut katust ja on eelnevalt teada, et soovitakse kasutada päiksepaneelidele.[20]



Joonis 4.1. Päiksepaneelide paigaldus viilkatusele [20].



Joonis 4.2. Päikesepaneelide paigaldus lamekatusele [20].



Joonis 4.3. Päikesepaneelide kasutus katuse materjalina [21].

Maapinnale paigaldatakse üldjuhul kahel erineval viisil, kas statsionaarsed, kus mõningal juhul saab muuta ka päikesepaneelide kaldenurka (joonis 4.4), või päikest jälgivad süsteemid (joonis 4.5). Päikest jälgivatel süsteemidel võib tootlikkus olla 20-25-protsenti suurem, kuid nii paigalduskulud kui ka hoolduskulud on suuremad. Statsionaarsete paigaldiste puhul tuleb kinnitada raamistik maapinnale, selleks kasutatakse üldjuhul kas vundamenti, kruvi- või rammvaiasid. Maapinnale paigaldamine eeldab vaba ala ning peab jälgima, et poleks objekte, mis varjaksid päikese valgust. [20] Võrreldes katustega on

maapinnale paigaldamise eelis see, et paneele on lihtsam puhastada ning tuul jahutab paremini, mis võib suurendada tootlikkust 5-protsenti võrreldes viilkatusega[21].



Joonis 4.4. Statsionaarne alus [19].



Joonis 4.5. Päikest jälgiv süsteem [19].

Antud töö raames valitakse statsionaarne süsteem (joonis 4.6), mis paigaldatakse maa külge kuue maakruviga (lisa 1). Statsionaarse süsteemi kasuks antud juhul räägib lihtne lumepuhastus talvel ning suvila kõrval asub kahe hektari suurune heinamaa, mis ei leia sihtotstarbelist kasutust. Lisaks puuduvad läheduses puud ja hooned, mis varjutaks päikesevalgust.



Joonis 4.6. Töös kasutatav päikesepaneelide alusraam.

Päikesepaneelide suund tuleb kindlaks määrata kaardi ja nurgamõõtja abil. Asimuut on päikesepaneelide nurk lõuna suuna suhtes, antud juhul on nurgaks 0° lõuna suhtes (joonis 4.7).



Joonis 4.7. Päikesepaneelide suund [1].

Päikesepaneelide kaldenurga arvutamiseks on vaja teada asukoha laiuskraadi, mis valitud kohas on $58,5^\circ$ [1]. Laiuskraadist lähtuvalt arvutame välja päikesepaneelide kaldenurgad kõikideks aastaaegadeks.

Talvine päikesepaneelide kaldenurk maapinna suhtes on leitav valemist

$$\alpha_t = (B * 0,9) + 29^{\circ} \quad 4.1$$

kus α_t on talvine päikesepaneelide kaldenurk $^{\circ}$;
 B – laiuskraad $^{\circ}$ [17].

Suvine päikesepaneelide kaldenurk maapinna suhtes on leitav valemist

$$\alpha_s = (B * 0,9) - 23,5^{\circ} \quad 4.2$$

kus α_s on suvine päikesepaneelide kaldenurk $^{\circ}$;
 B – laiuskraad $^{\circ}$ [17].

Kevad/sügis päikesepaneelide kaldenurk maapinna suhtes on leitav valemist

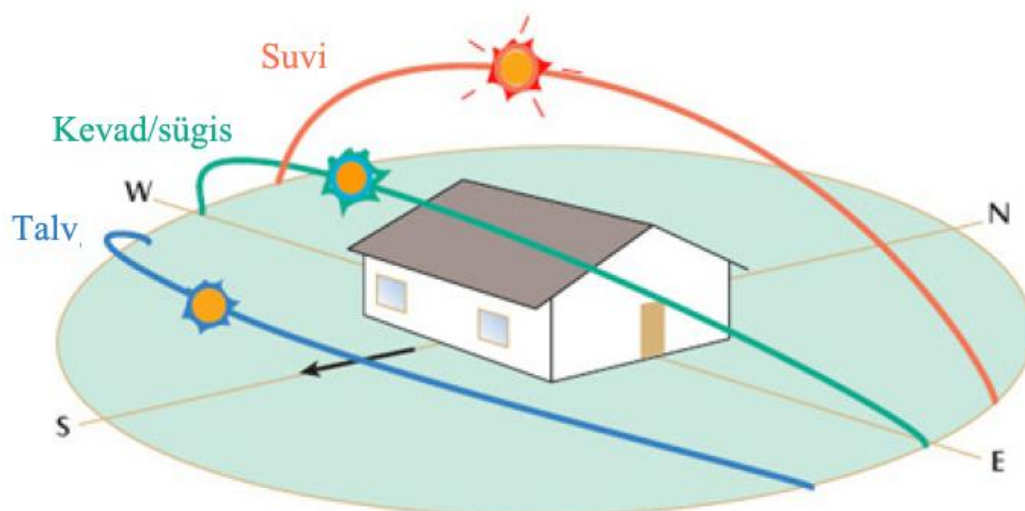
$$\alpha_{k/s} = B - 2,5^{\circ} \quad 4.3$$

kus $\alpha_{k/s}$ on kevad/sügis päikesepaneelide kaldenurk $^{\circ}$;
 B – laiuskraad $^{\circ}$ [17].

Tabel 4.1. Päikesepaneelide kaldenurk eri aastaegadel.

Aastaeg	Kaldenurk, $^{\circ}$
Talv	81,7 $^{\circ}$
Suvi	29,2 $^{\circ}$
Kevad/sügis	56 $^{\circ}$

Valemitest 4.1-4.3 saadud tulemuste (tabel 4.1) järgi näeme, et eri aastaegadel on soovituslik kaldenurk erinev, mis tuleneb päikese liikumisest eri aastaegadel (joonis 4.8).



Joonis 4.8. Päikese liikumine eri aastaegadel [18].

Tõstmaks päikesepaneelide tootlikkust, tuleks pidevalt kaldenurka muuta või leida optimaalne nurk, mis tagab vajaliku tootlikkuse. Antud töö raames määrame esialgseks päikesepaneelide kaldenurgaks suvise väärtuse, kuna peamine kasutatavus leiab aset suvekuudel. Talviti on ka tarbijaid vähem, sest nii veeautomaat kui külmkapp ei leia kasutust. See vähendab ligemale 52-protsenti tarbimisest, lisaks saavad akud täis laadida esmaspäevast reedeni, kui suvila ei leia kasutust.

4.2. Töö jaoks vajaminevate päikesepaneelide valik ning arvutused

4.2.1. Päikesepaneelide võimsus

Paneelide võimsuse arvutamisel tuleb arvestada erinevate paigaldusasukohtade ja ilmastikutingimustega. Kõige olulisem kriteerium, millega tuleb arvestada *off-grid* süsteemi juures, on tarbimisiseloom. Siin kohal saab määravaks kas elamu on aastaringselt kasutusel või ainult suvisel perioodil. Põhjus seisneb päikselise aja kestvuses ööpäevas, mis on talviti märgatavalt väiksem, mis omakorda tähendab väiksemat tootlikkust PV-paneelide poolt. Eesti Ilmateenistuse andmete kohaselt on jaanuarikuu keskmine päikesepaiste aeg kuu lõikes 20-25 tundi, aga see eest mai kuus 380-420 tundi [23]. Tabelis 4.2 on näitena välja toodud 2018 aasta andmed.

Tabel 4.2. 2018 aasta keskmine õhutemperatuur ja päikesepaiste aeg [23].

Kuu	Keskmine õhutemperatuur, °C	Keskmine päikesepaiste aeg, h
Jaauar	-1,5	23,2
Veebruar	-6,9	78
Märts	-3,3	165
Aprill	5,7	201
Mai	14,4	408,4
Juuni	15	315,4
Juuli	19,9	309
August	18,3	250
September	14,2	179,5
Oktoober	7,8	106
November	3,5	27
Detsember	-1,4	7

Antud töö raames lähtume paneelide võimsuse arvutamisel valemist, mis on välja toodud raamatus „Elekter päikesest ja tuulest“

$$P_{pv} = E_p \cdot K, \quad 4.4$$

kus P_{pv} on paneelide võimsus W;

E_p – päevane energiavajadus Wh;

K – koefitsient, mis arvestab kasutamise intensiivsust [3.141].

Koefitsient K kasutades on ette antud kolm vahemikku: 1) suvila, mida kasutatakse nädalalõppudel ($K=0,1-0,15$); 2) suvine pidev kasutus ($K= 0,2-0,3$) ja 3) aastaringne kasutus ($K=0,4-0,6$) [3.141]. Antud juhul on valitud aastaringne kasutus, kuigi tegu on suvilaga, mida kasutatakse peamiselt aprillist septembrini. Põhjus seisneb akude isetühjenemises, valides aastaringse kasutuse saame suurema tootlikkusega PV-paneelide süsteemi, mis peaks hoidma akud täis ka talvekuudel, mis omakorda välistab akude isetühjenemisel tekkiva talvise läbikülmumise ohu. Lisaks sellisel juhul on vajaduse tekkel tagatud energia varustus ka talvisel perioodil.

Valem 4.4 ei arvesta PV-paneelide temperatuuri sõltuvust ja paneelidel ladestuvat mustust, mis võivad vähendada tootlikkust 15-25-protsenti [24]. Sellest lähtuvalt leiame uue päevase energiavajaduse kasutades valemit

$$E_{pe} = \frac{E_p}{0,80}, \quad 4.5$$

kus E_{pe} on päevane energiavajadus, mis arvestab temperatuuri ja mustuse sõltuvust Wh;

E_p – päevane energiavajadus Wh.

$$E_{pe} = \frac{1667}{0,80} = 2084 \text{ Wh}$$

Leiame paneelide võimsuse kasutades valemist 4.4

$$P_{pv} = 2084 \cdot 0,6 = 1250 \text{ W}$$

Kasutades PVGIS keskkonda saame kontrollida saadud tulemust. Arvutustes vajaminevad andmed on kantud tabelisse 4.3 [25].

Tabel 4.3. PVGIS süsteemi sisestatavad andmed.

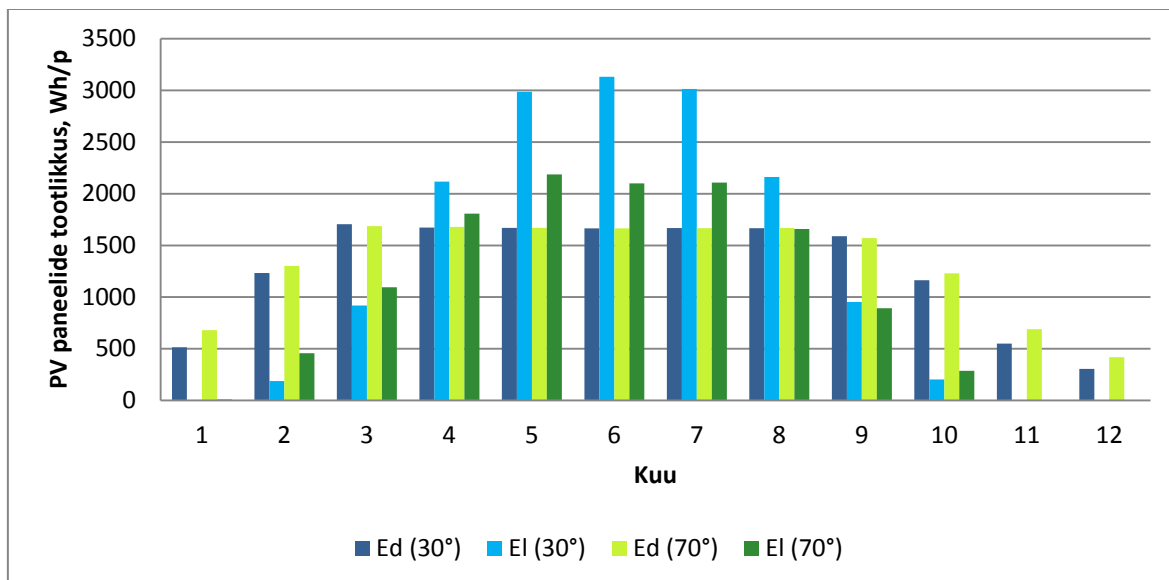
Koordinaadid	B: 58°30'9,118" L: 24°51'43,052"
PV paneelide võimsus, W	1250
Akupanga energia mahutavus (C_{100}), Wh	10800
Akupanga minimaalne laetuse tase, %	40
Päevane energiavajadus, Wh	1667
Kaldenurk, °	30/70
Asimuut, °	0

Arvutused on tehtud nii kolmekümne kui ka seitsmekümne kraadise paneelide paigaldusnurgaga, et näha tootlikkuse erinevust eri kuudel ning selle põhjal otsustada lõplik PV-paneelide kaldenurk. Seitsekümmend kraadi oleks kevad/sügis ja talvise perioodi vahepealne väärtus.

Tabel 4.4. PVGIS arvutustulemused [25].

Kuu		30°		70°	
		E_d , Wh/p	E_l , Wh/p	E_d , Wh/p	E_l , Wh/p
1.	Jaanuar	513,79	4,9	679,72	9,8
2.	Veebruar	1232,41	187,3	1300,38	457,6
3.	Märts	1705,23	918,5	1686,83	1095,5
4.	Aprill	1673,47	2116,8	1678,16	1807,7
5.	Mai	1669,93	2985,5	1669,39	2187,3
6.	Juuni	1664,34	3132,1	1664,89	2100,7
7.	Juuli	1667,85	3014,3	1666,85	2108,2
8.	August	1666,19	2162,3	1668,75	1658,9
9.	September	1589,38	952,2	1571,06	892
10.	Oktoober	1163,87	203,5	1229,14	287
11.	November	549,95	0	689,1	0
12.	Detsember	304,73	0	419,02	0

Tabelis 4.4 on välja toodud keskmiselt toodetu energiakogus päevas (E_d) ja päevas keskmiselt mittedalvestatud energia (E_l). Tulemused on nii 70 kraadise kui ka 30 kraadise PV-paneelide kaldenurgaga.



Joonis 4.9. PVGIS tulemuste võrdlus.

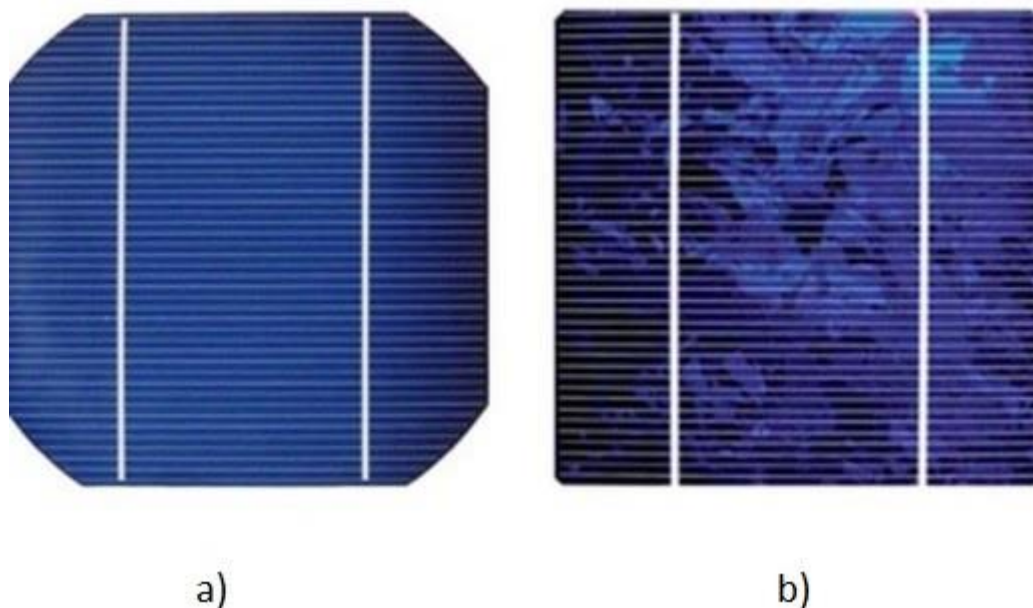
Muutes kaldenurga 70 kraadi peale saavutame aasta lõikes parema tootlikkuse (joonis 4.9) ning lisaks vajub lumi paneelide pealt paremini maha. Lõplik PV-paneelide kogus tuleb peale aastast katseperioodi ja andmetöötlust, mis peaks ära näitama, kas antud süsteem tagab piisava energiakoguse.

4.2.2. Päikesepaneelide valik

PV-paneelidega muundatakse päikseenergia elektrienergiaks, selleks kasutatakse pooljuhtide fotoelektrilisi omadusi. Hetkel enim levinumaid PV-paneelide tüüpe on kolm: 1) monokristallilised päikesepaneelid, 2) polükristallilised päikesepaneelid ning 3) *thin film*. [3.113] Kuna *thin film* PV-paneelid on madala kasuteguriga, siis teeme antud töö raames valiku mono- või polükristalliliste paneelide vahel [27].

Monokristallilised päikesepaneelid koosnevad elementidest, mis valmistatakse suurtest ümarakujulistest ränikristallide viiludest. Silindrilised ränikristallid valmivad *Czochralski*

meetodil. Sellisel meetodil elementide tootmisega kaasneb suur kogus räni jääki, kuna ümarate elementide servad lõigatakse osaliselt ära (joonis 4.10). [27]



Joonis 4.10. Päikesepaneelide elementide erinevad lahendused: a) monokristallilised; b) polükristallilised [26].

Monokristalliliste päikesepaneelide eelised:

- 1) kõrgema kvaliteediga räni tagab kõrge efektiivsuse 15-25-protsenti;
- 2) pikk eluiga, suurusjärgus 25 aastat, mis võimaldab pakkuda tootjatel pikka garantiid;
- 3) halvemate valgustingimustega olukordades on parem tootlikkus kui polükristallilistel päikesepaneelidel;
- 4) parim tootlikkus väiksema pinnaga.[27]

Monokristalliliste päikesepaneelide puudused:

- 1) hind on mõnevõrra kallim, kuid on languses;
- 2) tootmisel tekib palju räni jääke.[27]

Polükristalliliste päikesepaneelide elemendi valmistatakse sulatatud toorränist, mis valatakse kandilistesse vormidesse (joonis 4.10)[27].

Polükristalliliste päikesepaneelide eelised:

- 1) odavam toota kui monokristallilisi paneele;
- 2) soojem temperatuur mõjutab vähem efektiivsust kui monokristallilistel paneelidel.[27]

Polükristalliliste päikesepaneelide puudused:

- 1) ebakvaliteetne räni viib paneelide tootlikkuse alla, tootlikkus üldiselt 13-16-protsenti, kuid tootlikkus on läinud järjest paremaks;
- 2) Suurema tootlikkuse saamiseks kulub rohkem vaba pinda.[27]

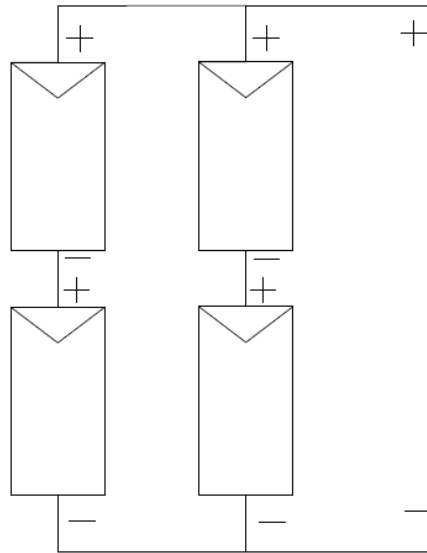
Table 4.5. Päikesepaneelide tehniliste parameetrite võrdlus.

	Luxor ECO LINE P72/330W [28]	LG330N1C-A5 NeON2 [29]
Efektiivsus, %	17,03	19,3
Elemendi tüüp	Polükristalliline	Monokristalliline N-tüüp
P_{max} , W	330	330
U_{oc} , V	46,29	40,9
U_{mpp} , V	37,66	33,7
I_{mpp} , A	8,77	9,8
I_{sc} , A	9,27	10,45
Raami materjal	Anodeeritud alumiinium	Anodeeritud alumiinium
Maksimaalne surve (eest poolt), Pa	5400	6000
Garantii, a	15	25
Väljund võimsuse garantii	25 aasta pärast on 86% P_{amx}	25 aasta pärast on 85% P_{amx}



Joonis 4.11. Päikesepaneel LG330N1C-A5[30]

Lähtudes tabelis 4.5 välja toodud näitajatest, kasutatakse antud töö raames LG330N1CA5 NeON2 päikesepaneeli (joonis 4.11). Antud juhul sai otsustavaks kolm kriteeriumit: 1) efektiivsus; 2) garantii ja 3) elemendi tüüp.



Joonis 4.12. Päikesepaneelide ühendusskeem.

Töös kasutatakse nelja päikesepaneeli, päikesepaneelide ühendusskeem on väljatoodud joonisel 4.12. Paneelide kokku ühendamisel vastavalt joonisele 4.12, saadakse väljund väärtused: 1) $P_{max} = 1320 \text{ W}$; 2) $U_{oc} = 81 \text{ V}$ ja 3) $I_{mpp} = 19,6 \text{ A}$.

5. INVERTER JA LAADIMISKONTROLLER

Inverteri eesmärk on päikesepaneelidest tulev alalisvool muundada ümber vahelduvvooluks, et oleks võimalik järgi ühendada 230VAC tarbijaid. Inverteri valimisel tuleb jälgida konkreetse süsteemi parameetreid (tabel 5.1) ning sellest lähtuvalt teha valik.[3.138]

Tabel 5.1. Olulised parameetrid konkreetse töö inverteri valikul.

Parameeter	Väärtus
Akupanga pinge, V	24
Inverteri võimsus, W	$\geq 1213^*$
Väljundpinge, VAC	230
Väljundsagedus, Hz	50
Siinussignaali	<i>true sine wave</i>

*Tabelis 2.3 seadmete võimsuse kogusumma

Laadimiskontrolleri eesmärk *off-grid* süsteemides on päikesepaneelide poolt toodetava energia sobilikuks silumiseks akude laadimise ning 12 V DC tarbijate jaoks. Akude korrektne laadimine tagab nende pika eluea. Tööpõhimõttelt jagunevad laadimiskontrollerid kahte rühma: 1) PWM ja 2) MPPT. Kui PWM laadimiskontroller alustab alles siis laadimist, kui päikesepaneelid pinge jõuab laadimiseks sobivale tasemel, siis MP laadimiskontrolleri töötab maksimaalse võimsuspunkti tehnoloogial. Kuna MPPT laadimiskontrolleriga on võimalik toota 30-protsenti rohkem energiat, siis valiku tegemisel keskendutakse MPPT tehnoloogial põhinevatele laadimiskontrolleritele.[3.136]

MPPT kontrolleri sisendpinge (MPP voltage range) võib jääda vahemikku 6-1000 VDC (igal kontrollril on see erinev). Kogu sisendpinge ulatuses leiab kontrolleri ülese MPP punkti ja DC-DC muundur hoiab väljundpinget vajalikul tasemel. Laadimine toimub optimaalsel tasemel kogu sisendpinge vahemikus. Kõrgema sisendpinge saamiseks ühendatakse paneelid MPPT kontrolleri sisendisse järjestikku ja kontrolleri tehnilistes andmetes esitatakse paneelide maksimaalne lubatud avatud ahela pinge U_{oc} .[3.137]

Kogu süsteemi lihtsustamise mõttes on valitud kaks ühes seade Victron Energy EasySolar 24/1600/40 (joonis 5.1), mis sisaldab endas nii inverterit kui ka laadimiskontrollerit.

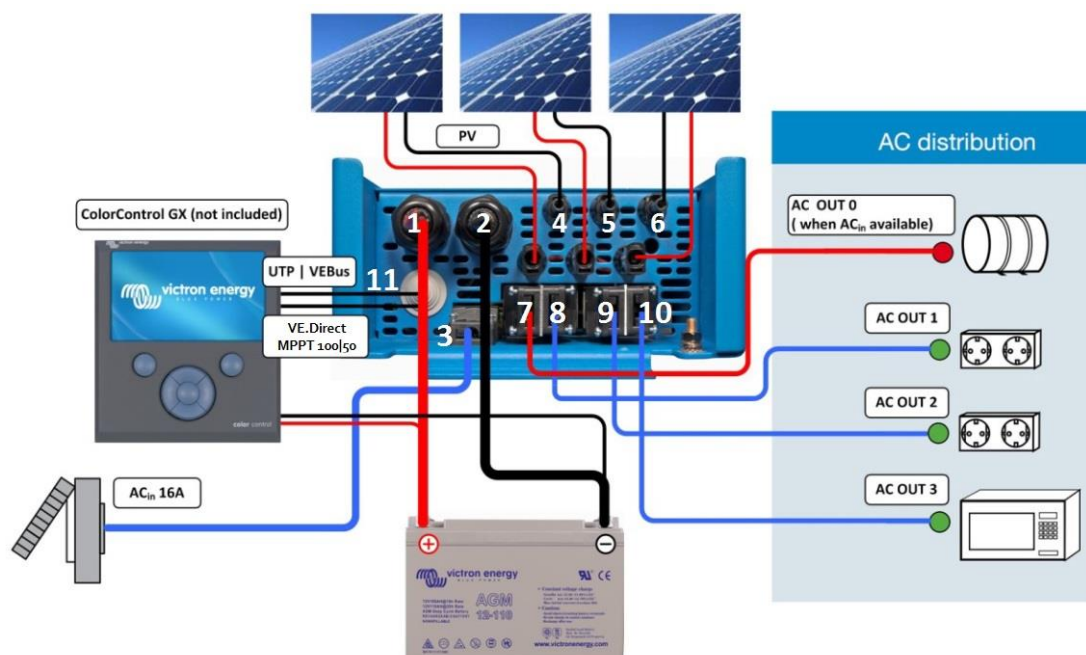
Valitud seadme eelised: 1) kahe seadme asemel on üks, mis vähendab kaablite ühendusi seadmete vahel; 2) sisseehitatud laadija, võimaldab generaatori või võrguühenduse olemasolul laadida vajadusel akusid; 3) sisseehitatud kaitsmeplokk AC tarbijatele; 4) AC tarbijate ees on rikkevoolukaitse 30 mA ja 4) distantsilt jälgimise võimalus. Lõpptulemuseks on üks kompaktne seade.[31]



Joonis 5.1. Victron Energy EasySolar 24/1600/40 [31].

Joonisel 5.2 on kujutatud seadme sisend- ja väljundühendused:

- 1) positsioon 1 ja 2 on aku ühenduspistikud (pluss ja miinus kaabel), komplektis on kaasas 1,5 m aku kaablit;
- 2) positsioon 3 on G-ST18i pistik välise vahelduvvoolu sisendi jaoks, et tagada sisseehitatud laadijale ning positsioonil 7 pistiku toide;
- 3) positsioonid 4-6 on kolmene komplekt MC4 pistikuid PV paneelide ühendamiseks;
- 4) positsioon 7 on vahelduvvoolu tarbija ühendus läbi C16A kaitsme, toide on tagatud juhul kui külge on ühendatud väline vahelduvvoolu allikas;
- 5) positsioonid 8-9 on vahelduvvoolu tarbija ühendus läbi C10A kaitsme;
- 6) positsioon 10 on vahelduvvoolu tarbija ühendus läbi C16A kaitsme;
- 7) positsioonil 11 on väline juhtkontroller, mida antud mudeliga kaasas pole [32].



Joonis 5.2. Victron Energy EasySolar 24/1600/40 sisend- ja väljundühendused[32].

Tabel 5.2. Victron Energy EasySolar 24/1600/40 tööparameetrid[32].

Inverter	
Sisendpinge vahemik, V	19-33
Väljundpinge, VAC	230
Väljundsagedus, Hz	50
Pidev väljundvõimsus 25°C juures, W	1300
Maksimaalne võimsus, W	3000
Efektiivsus, %	94
Laadija	
Sisendpinge vahemik, VAC	187-265
Sisendsageduse vahemik, Hz	46-65
Absorbtsioonlaadimis pinge, V	28,8
Hoolduslaadimise pinge, V	27,6
Laadimisvool, A	40
Aku temperatuuriandur	Jah
Laadimiskontrolleri	
Maksimaalne väljundvool, A	50
Maksimaalne PV-paneelide võimsus, W	1400
Maksimaalne PV-paneelide avatud ahela pinge, V	100
Absorbtsioonlaadimis pinge, V	28,8
Hoolduslaadimise pinge, V	27,6
Efektiivsus, %	98
Korpus	
Materjal	Alumiinium
IP -kaitseaste	IP21

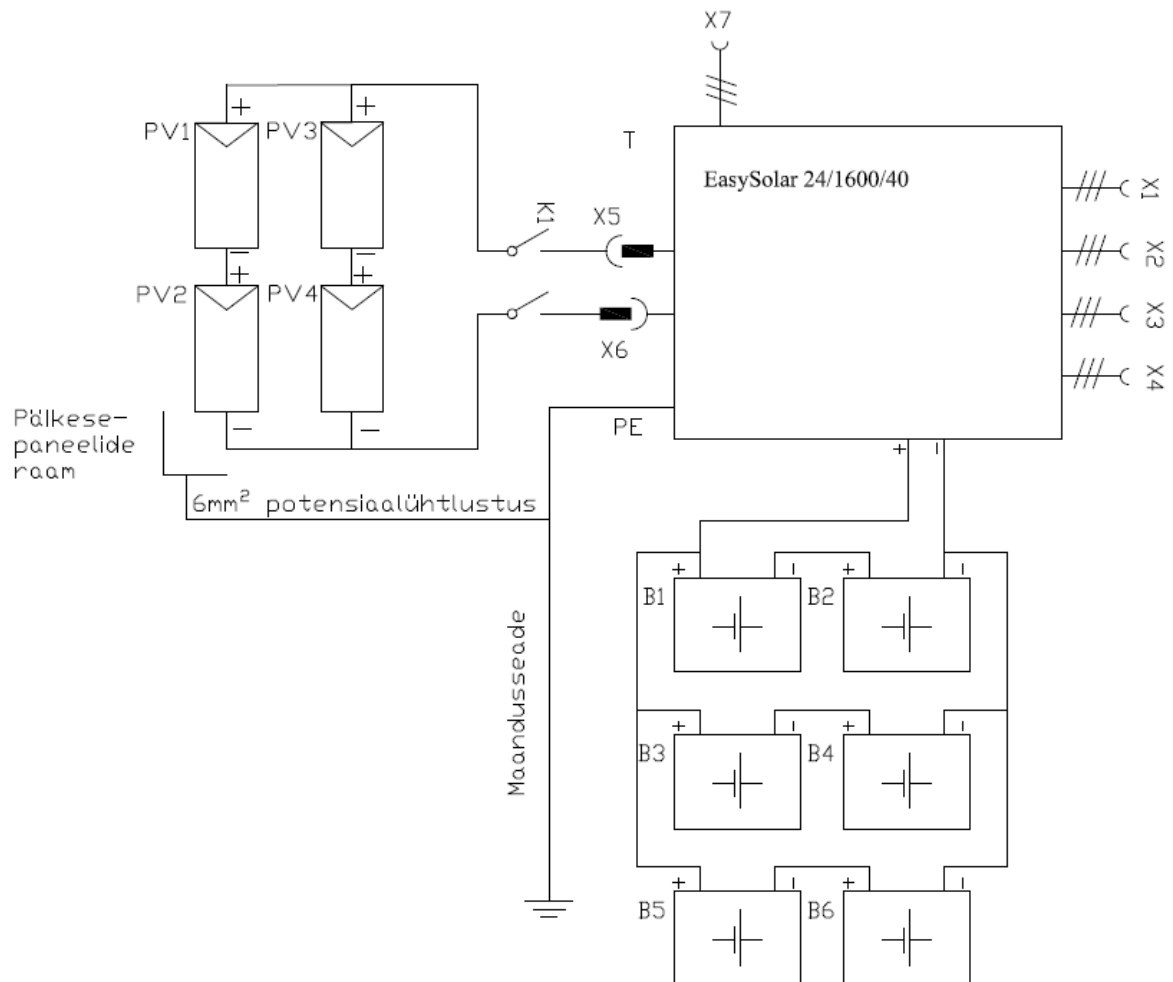
Kaal, kg	15
Mõõtmed, mm	745x214x110

Tabelis 5.2 on välja toodud EasySolar 24/1600/40 põhilised tööparameetrid, mis peavad kokku sobima teiste valitud seadmetega. Laadimiskontrolleri maksimaalne PV-paneelide avatud ahela pinge võib olla 100 V, sellest tulenevalt on tehtud ka paneelide omavaheline kokkuühendamise skeem (4.12), et pinge ei ületaks 100 V. Näiteks ühendades kõik paneelid järjestikku, siis tuleks PV-paneelide avatudahela pinge 163,6 V, mis ületaks lubatud parameetrid.

6. ÜHENDUSSKEEM

Joonisel 6.1 on kujutatud seadmete omavahelisi ühendusi, kus:

- 1) PV1–4 – päikesepaneelid;
- 2) K1– kaitselahutus, standard EVS 812-7:2018 näeb ette, et süsteemis peab olema tagatud kaitselahutus alalisvoolule [4];
- 3) X5–6 – päikesepaneelide ühenduspistikud MC4;
- 4) T– EasySolar 24/1600/40;
- 5) X7 – vahelduvvoolu sisend;
- 6) X1 – vahelduvvoolu väljund, juhul kui X7 on ühendatud;
- 7) X2–4 – inverteri vahelduvvoolu väljundid;
- 8) B1–6 – akud.



Joonis. 6.1. Süsteemi lihtsustatud ühendusskeem.

7. KAITSE ELEKTRILÖÖGI EEST

Elektriohutuse tagamiseks on töös lähtutud standarditest EVS-IEC 60364 [4], EVS-EN 60529[4] ning kasutatud järgmisi kaitseviise:

- 1) põhikaitsena – põhiisolatsioon, kaitsekatted ja ümbrised;
- 2) rikkekaitsena – kaitsemaandamine, automaatne väljalülitamine, potentsiaalide ühtlustus;
- 3) lisakaitsena – rikkevoolu kaitselülitid.

Inimeste kaitse elektrilöögi eest peab tagama elektripaigaldise pingeltide osade puutepinge alla 50V. See saavutatakse: 1) toite kiire väljalülitamisega; 2) kaitsemaanduse ja potentsiaaliühtlustusega ning 3) alla 30 mA rakendusvooluga rikkevoolukaitsete kasutamisega.

Puutepingekaitse tingimuste täitmist kontrollida vastavalt kehtiva standardi EVS-HD-60364-4-41 nõuetele [4]. Kaitseseadmed peavad tagama rikke korral väljalülitusaja 0,4 s ($U_0=230$ V).

Hoonele on vajalik ehitada maandusseade millega ühendatakse: 1) inverteri PE-juht; 2) päikesepaneelide paigaldusraamid ja 3) hoone pingeltid metallkonstruktsioonid. Kaitsejuhina kasutada juhtmestiku kolla-rohelist soont. Potentsiaaliühtlustus tuleb teostada kolla-rohelise isolatsiooniga ning minimaalselt 6mm² üksikjuhtme abil.

8. SÜSTEEMI LIGIKAUDNE MAKSUMUS

Süsteemi maksumus (tabel 7.1) ei kajasta suvila elektrilahenduse hinda, hind sisaldab päikseenergia süsteemi komponente ja lisatarvikuid. Hinna sisse ei ole arvestatud ka tööaja kulu, sest õppetöö eesmärgil tehakse kogu paigaldus teema autori poolt.

Table 7.1. Süsteemi ligikaudne maksumus.

Komponent	Hind tk, €	Kogus, tk	Hind, €
HOPPECKE SOLAR.BLOC 150	305,59	6	1833,54
LG330N1CA5 NeON2 [35]	208	4	832
EasySolar 24/1600/40 [35]	1129	1	1129
Alusraam	150	1	150
MC4-socket PV-KBT 4/6I [35]	1,53	7	10,71
MC4-plug PV-KST 4/6I [35]	1,27	7	8,89
MC4 Branch plug PV-AZS4 [35]	4,32	1	4,32
MC4 Branch socket PV-AZB4 [35]	4,37	1	4,37
HIKRA Pro 1x4mm ² , 100m [35]	56	1	56
Kõri FFKU-EM-F-UV 20 must [33]	0,3	50	15
KAABEL XYM-J/NYM 3X2.5 [34]	0,79	2	1,58
ABB pistikupesa DIN-liistule [33]	6,93	1	3,49
KRUVI HEX-160 M16 76X1550 [36]	79,45	6	476,7
Kulutarvikud	200	1	150
ABB kilp IP40 6M [33]	6,08	1	6,08
ABB Pealüliti 1P 63A [33]	6,79	2	13,58
Kokku			4748,7

Ühe aku hind on 264,18 £ [6] ehk 305,59 € [7]. Alusraami hind on saadud ligikaudsel hinnapakkumisel metalliettevõtte poolt, mis peaks sisaldama materjali ja töö hinda. Alusraami kinnitamiseks on valitud maakruvid HEX-160 M16 76x1550 (lisa 1), et kiirendada tööde kulgu ning vältida vundamendi kaevetöid. Kaitsmekarp kinnitatakse EasySolar 24/1600/40 vahetus lähedusse, milles paiknevad: 1)kaks pealüliti, millega tagatakse alalisvoolu kaitselahutus ja 3) DIN-liistule kinnituv pistikupesa vahelduvvoolu sisendi jaoks seadmele EasySolar 24/1600/40. MC4 pistikud on kasutusel PV-paneelide ühendamisel. Kaablikõri on lisatud, kuna standard EVS 812-7:2018 näeb ette, et kõik kaablid, mis jäävad pinge alla, peavad asetsema kõri sees. Mõlemasse otsa tuleb lisada selgesti loetav silt, näiteks „PV“. Eraldi on lisatud kulutarvikud, kuna kõiki materjale, mis kuluvad paigaldamisele, pole võimalik ette näha ilma eelneva süsteemi

paigalduskogemuse. Eialgseks lõpphinnaks kujunes 4748,7 €, millele lisanduvad tarnehinnad.

KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöö uuritavaks objektiks oli Pärnumaal, Tori vallas, Muraka külas paiknev suvila, kus soovitakse päikeseenergia abil varustada hoone elektriga. Peamiselt kasutatakse hoonet aprillist septembrini ning töö eesmärk oli saavutada piisava tootlikkusega süsteem, mis tagab esmased elektrienergia vajadused sellel perioodil. Seadmed paigutatakse 5,2 meetri kaugusel olevasse abihoonesse ning päikesepaneelid hakkavad asetsema suvila kõrval oleval heinamaal.

Enne päikeseenergia süsteemi rajamist tuli välja selgitada elektrienergia tarbimine. Kuna eelnevalt pole antud hoonel elektriliitumist olnud, siis tuli välja selgitada potentsiaalsed tarbijad ning nende võimsus, millest lähtuvalt arvutati ööpäevane energiavajadus. Valgustite koguse väljaselgitamiseks kasutati projekteerimistarkvara DIALux evo. Ööpäevane energiavajadus saadi ligikaudu 1667 Wh.

Süsteemi seadmete valikul lähtuti efektiivsusest ning ka hoone ja asukoha iseärasustest. Kõigepealt leiti vajalik akude mahutavus, kus võeti arvesse ka kahepäevane varutegur, et tagad pilviste ilmadega energiavarustus. Akude arvutuslik mahutavus tuli 347 Ah, sellest lähtuvalt moodustati kuuest akust akupank mahutavusega 450 Ah ning süsteemi pingeks määrati 24 V DC. Kasutatakse AGM-akusid, et vältida pidevat elektrolüüdi taseme jälgimist.

Päikesepaneelideks valiti monokristallilised päikesepaneelid firmalt LG, valikus sai määravaks suurem efektiivsus ning garantii. Päikesepaneelide koguvõimsus on 1320 W. Tootlikkuse kontrollimiseks kasutati PVGIS programmi, kus simulatsiooni käigus selgus, et töös määratud perioodil, aprillist septembrini, on tagatud piisav tootlikkus. Päikesepaneelid paigaldatakse maapinnale.

Süsteemi kompaktsuse eesmärgil valiti kaks ühes seade Victron Energy EasySolar 24/1600/40, mis sisaldas nii inverterit kui ka laadimiskontrollerit. Lisaks on sisseehitatud ka rikkevoolukaitse ning kõigil kolmel AC väljundil on ees liinikaitsmed. Laadimiskontroller töötab MPPT tehnoloogial, mis tagab ligemale 30-protsenti suurema

päikesepaneelide tootlikkuse. Lisavõimalusena saab ühendada külge generaatori, millega saab vajadusel laadida akusid.

Süsteemi koguhind tuli 4749 €, hinna sisse pole arvestatud töörahasid ning transpordikuluseid. Süsteemi kallimad osad on akud, maksumusega 1833,54 € ning inverter ja laadimiskontrolleri seade, maksumusega 1129 €.

Antud hetkel on töö teoreetiline, mis põhineb arvutustel ning PVGIS simulatsioonil. Loogiline töö jätk oleks peale süsteemi paigaldamist kontrollida teoreetiliste tulemuste vastavust. Mõõtmistulemustest lähtuvalt tuleks teha süsteemi korrigeerimist, näiteks muuta vajaduse tekkel akupanga mahutavust või päikesepaneelide kogust.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Maa-ameti Geoportaal [veebileht] <https://geoportaal.maaamet.ee/> (9.04.2019)
2. Riigiteataja [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/13058153> (9.04.2019)
3. **Pinn, M., Pinn, R., Pinn, M.** (2012). Elekter päikesest ja tuulest. Tallinn : Ecoprint
4. Eesti standardikeskus [veebileht] <https://www.evs.ee/> (27.03.2019)
5. Pangea Builders [veebileht] <https://pangeabuilders.com/what-is-the-advantage-of-a-24v-system-over-a-12v-system/> (23.04.2019)
6. Off-Grid Europe [veebileht] <https://www.off-grid-europe.com/batteries/absorbed-glass-mat/hoppecke-solar-bloc-150-12v-agm?> (24.04.2019)
7. Eesti Pank [veebileht] <https://www.eestipank.ee/valuutakursid> (24.04.2019)
8. Crown battery [veebileht] <https://www.crownbattery.com/news/what-is-a-deep-cycle-battery-> (24.04.2019)
9. Energysage [veebileht] <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/what-are-the-best-batteries-for-solar-panels/> (24.04.2019)
10. GridFree [veebileht] <https://gridfree.store/blog/what-battery-is-best-for-offgrid-solar/> (24.04.2019)
11. Webosolar [veebileht] <https://webosolar.com/blog/deep-cycle-flooded-lead-acid-battery-fla/> (24.04.2019)
12. Wikipedia [veebileht] https://en.wikipedia.org/wiki/Lead%E2%80%93acid_battery (24.04.2019)
13. **Rosin, A., Link, S., Hõimoja, H., Drovtar, I.** (2015). Energiasalvestid ja –salvestustehnoloogiad. Tallinn
14. Mozaw [veebileht] <https://mozaw.com/best-rv-deep-cycle-battery/> (24.04.2019)
15. LIGHTEN WORLD INDUSTRY [veebileht] https://www.lightenworld.com.tw/learning_detail2.php (24.04.2019)
16. **Voelker, P.** (2014) Trace Degradation Analysis of Lithium-Ion Battery Components [veebileht] www.RDmag.com (29.04.2019)
17. Sinovoltaics Group Limited [veebileht] <https://sinovoltaics.com/learning-center/system-design/solar-panel-angle-tilt-calculation/> (3.05.2019)
18. WinDecor [veebileht] <https://www.windecor.ca/faux-wood-vs-real-wood-blinds/sun-movement-summer-winter/> (3.05.2019)
19. ArevaSolar Estonia OÜ [veebileht] http://paikesepaneel.ee/Web/Paikesepaneelide_konstruktsioonide_muuk (3.05.2019)
20. Energiapartner OÜ [veebileht] <https://energiapartner.ee/paikesenergia/kinnitused-ja-kaldenurk/> (3.05.2019)
21. Solarstone [veebileht] <http://www.solarstone.ee/> (3.05.2015)
22. Taastuenergia [veebileht] <http://www.taastuenergia.ee/paikeseelektrijaam/paikeseelektrijaam-maapinnal/> (3.05.2019)
23. Eesti Ilmateenistus [veebileht] <https://www.ilmateenistus.ee/> (17.05.2019)
24. Waaree [veebileht] <https://www.waaree.com/sizing-an-off-grid-solar-power-plant> (17.05.2019)
25. PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM [veebileht] http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP (17.05.2019)

26. Solarroid [veebileht] <https://www.solarroid.com/difference-between-monocrystalline-polycrystalline-and-amorphous-thin-film-solar-cell/> (17.05.2019)
27. Solar review [veebileht] <https://www.solarreviews.com/blog/pros-and-cons-of-monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels> (17.05.2019)
28. Europe-Solar Store [veebileht] https://www.europe-solarstore.com/download/luxor/LX_EcoLine_P72_320-340W_datasheet.pdf (17.05.2019)
29. Europe-Solar Store [veebileht] https://www.europe-solarstore.com/download/lg/LG_NeON_2_330-335W_datasheet.pdf (17.05.2019)
30. LG [veebileht] <http://www.lg-solar.com/> (17.05.2019)
31. Europe-Solar Store [veebileht] <https://www.europe-solarstore.com/off-grid/victron/victron-easysolar/victron-easysolar-24-1600-40-16-mppt-100-50.html> (17.05.2019)
32. Europe-Solar Store [veebileht] <https://www.europe-solarstore.com/download/victron/Victron-EasySolar-1600VA-datasheet.pdf> (17.05.2019)
33. Esvika [veebileht] <https://www.esvika.ee/> (17.05.2019)
34. K-rauta [veebileht] <https://www.k-rauta.ee/> (17.05.2019)
35. Europ-Solar Store [veebileht] <https://www.europe-solarstore.com> (17.05.2019)
36. Maakruvi [veebileht] <https://maakruvi.ee/> (17.05.2019)
37. ACDC Dynamics [veebileht] <https://www.acdc.co.za/products/8-pv-panel-ground-mounting-system?variant=30469733836> (21.05.2019)

LISAD

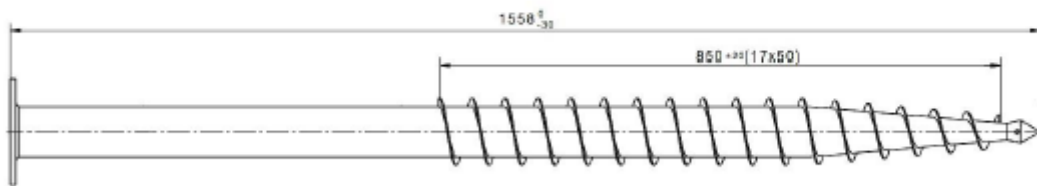
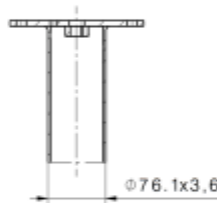
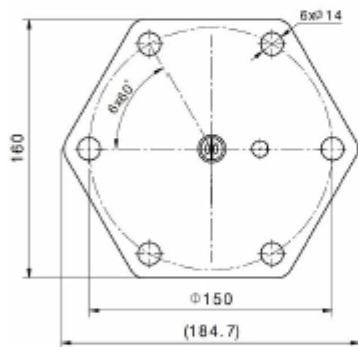
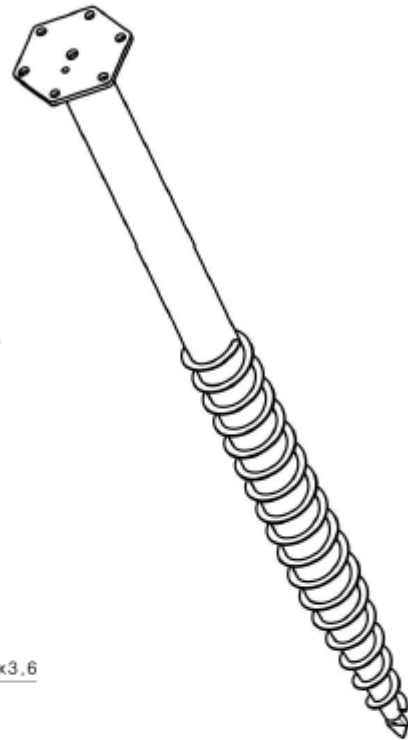
Lisa 1. Maakruvi

TECHNICAL DATA SHEET

F SCREW HEX-160 M16 76x1550

BASIC INFO

Article No.	56214
Weight	11,95 kg ^{+3% -0% tolerance}
Materials	Tube 76 x 3,6 x 1500 mm Flange 8 x 160 x 184,7 Steel S235
Surface	Hot-dip galvanized Steel, according to DIN EN ISO 1461
Installation	INSTALLATION MAST – HULK + drilling head PLATE MULTI PILE DRIVER MACHINE – DINO + drilling head PLATE MULTI
Intended Use	Lumber, board, batten fixing
Anchoring	1 x screw M16



BAYO-S SE • THE GROUNDS-CROO
ISO 9001:2008 • TAX ID: CZ01875744
Info@bayo-s.com • www.bayo-s.com

Lisa 2. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Timmo Antso,
sünniaeg 05.06.1987,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Suvila autonoomne energiavarustuse lahendus PV paneelidega,
mille juhendaja(d) on Andres Annuk,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, _____
(kuupäev)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri) (kuupäev)
